ÉCOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSÉES **Année 2009-2010**

Mastère Génie Civil Européen

Géotechnique

Remblais sur sols compressibles

Étude d'un remblai sur sols compressibles

L'aménagement d'un terre-plein a nécessité la construction en plusieurs étapes d'un remblai de grande superficie reposant sur une forte épaisseur de sols argileux compressibles. Au cours de la construction, une rupture s'est produite dans le remblai. Le maître d'œuvre a demandé une étude complémentaire afin de permettre l'achèvement du chantier dans le délai prévu.

Vous êtes chargé de cette étude. Votre travail comporte trois phases successives :

- étude des informations disponibles afin d'expliquer les causes de la rupture ;
- choix d'une méthode d'amélioration du sol de fondation et dimensionnement de la solution retenue ;
- contrôle de l'efficacité de la solution pour le compte de maître d'œuvre.

A. Données géotechniques et description du site

La coupe transversale du remblai et du sol de fondation dans la zone de la rupture est représentée sur la figure 1.

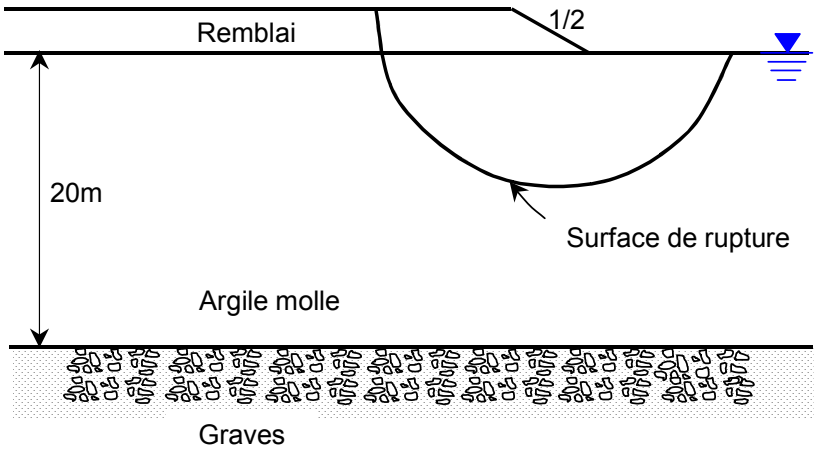


Figure 1 Coupe transversale du remblai et du sol de fondation.

Les propriétés physiques et mécaniques de l'argile molle sont rassemblées dans le tableau 1. On admet que la compression secondaire (ou fluage) de l'argile est négligeable. Le toit de la nappe se trouve à la surface du terrain naturel et les pressions interstitielles ont une distribution hydrostatique.

Les variations de la cohésion non drainée, mesurée au scissomètre de chantier, sur l'épaisseur de la couche d'argile molle sont représentées sur la figure 2.

Les caractéristiques mécaniques du matériau de remblai sont :

γ = 20 kN/m^3, c' = 0 et φ' = 35 degrés.

Tableau 1. Propriétés physiques et mécaniques de l'argile molle

Profondeur	Couche	e_0	γ (kN/m^3)	C_c	I_p	σ'_p (kPa)	$\Delta c_u/\Delta\sigma'_p$ (labo)	c_v (m^2/s)
0 – 2 m	I	1,7	16	0,7	40	40	0,3	2.10^{-7}
2 – 6 m	II	1,8	16	0,7	40	nc	0,3	2.10^{-7}
6 – 12 m	III	1,6	16	0,7	40	nc	0,3	2.10^{-7}
12 – 20 m	IV	1,5	16	0,7	40	nc	0,3	2.10^{-7}

nc = normalement consolidé

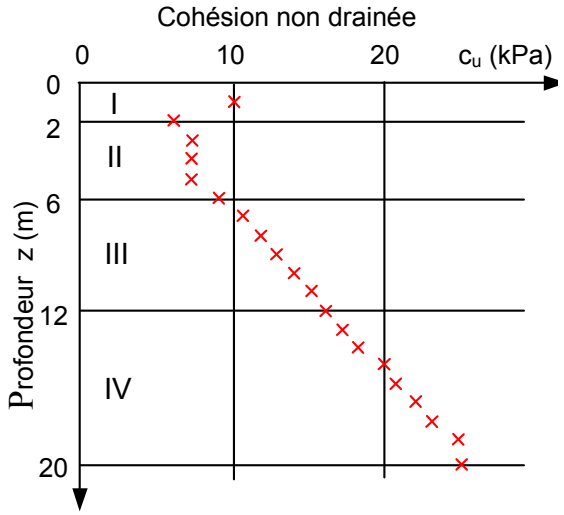


Figure 2. Variation de la cohésion non drainée de l'argile molle avec la profondeur.

Le projet prévoit de mettre en place 5,5 m de remblai pour obtenir, après tassement de l'argile, une plate-forme à la cote +3m par rapport au terrain naturel.

La rupture a eu lieu un an après le début du remblaiement. L'épaisseur du remblai était alors de 3m et l'on était en train de mettre en place 1m de remblai supplémentaire.

Des piézomètres ont été placés à 2 m, 5 m, 10 m et 15 m de profondeur sous le remblai afin de suivre la dissipation des surpressions interstitielles. Des tassomètres de surface permettent de suivre les tassements de la couche d'argile.

B. Étude des informations disponibles et analyse de la rupture

B1. Représenter sur un graphique les variations des contraintes avec la profondeur dans la couche argileuse avant la construction du remblai (contrainte totale verticale, pression interstitielle, contrainte effective verticale), d'après les données du tableau 1.

B2. Vérifier, avec les données du tableau 1, que l'épaisseur du remblai calculée dans le projet (5,5 m) permet effectivement d'obtenir, en fin de consolidation du sol, un tassement de 2,5 m et une plate-forme à la cote +3 m. On négligera dans ce calcul l'effet de l'enfoncement d'une partie du remblai dans la nappe phréatique.

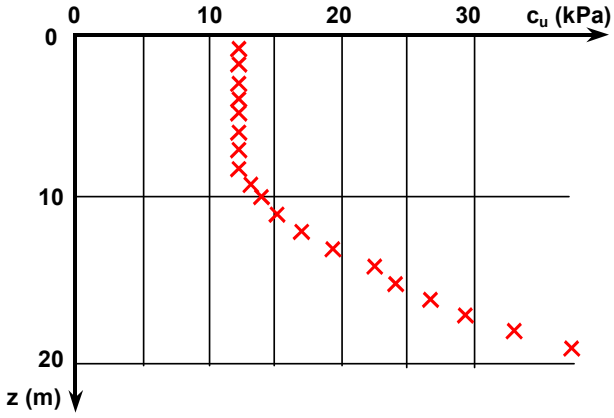
B3. Peu après les désordres observés dans le remblai, un piézomètre a été placé dans la couche perméable de graves qui est située sous la couche argileuse. Ce piézomètre indique une pression interstitielle de 240kPa (niveau artésien).

Représenter graphiquement la distribution d'équilibre réelle (non hydrostatique) des pressions interstitielles dans la couche argileuse, ainsi que la distribution finale des contraintes effectives verticales.

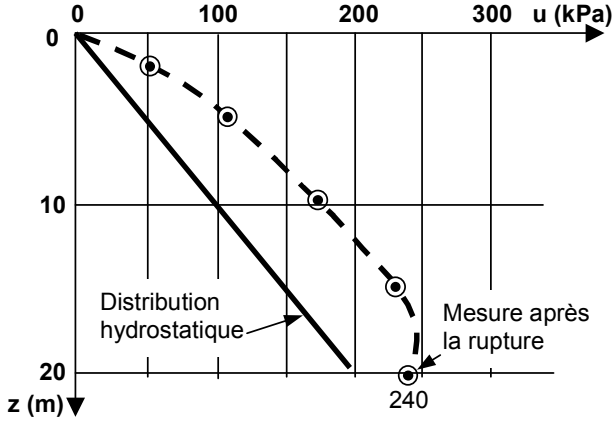
Déduire de la figure 2 la valeur du gradient moyen $\Delta c_u/\Delta\sigma'_p$ .Montrer que ce gradient d'augmentation de la cohésion non drainée est égal à ce que l'on peut déduire de la variation des contraintes effectives et de la valeur de $\lambda_{cu} = \Delta c_u/\Delta\sigma'_p$ déterminée en laboratoire et donnée dans le tableau 1 (On admettra que le sol est normalement consolidé dans les couches II à IV de la figure 2).

B4. Calculer l'épaisseur de remblai à mettre réellement en place compte tenu de l'existence du niveau artésien.

B5. Vérifier la compatibilité des valeurs de la cohésion non drainée mesurée après la rupture (figure 3a) et des surpressions interstitielles juste avant le rechargement du remblai qui a provoqué la rupture (figure 3b).



a. Cohésion non drainée après la rupture



b. Pressions interstitielles, sous 3 m de remblai

Figure 3. Résultats des mesures réalisées sous le remblai.

B6. Vérifier, en assimilant le sol à une couche d'argile molle homogène de 10 m d'épaisseur (les dix mètres supérieurs), que la stabilité du remblai n'était pas assurée pour des épaisseurs de remblai supérieures à 3 m (On utilisera les abaques de la figure 5).

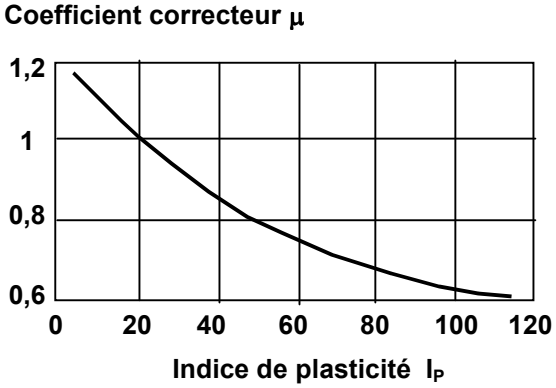
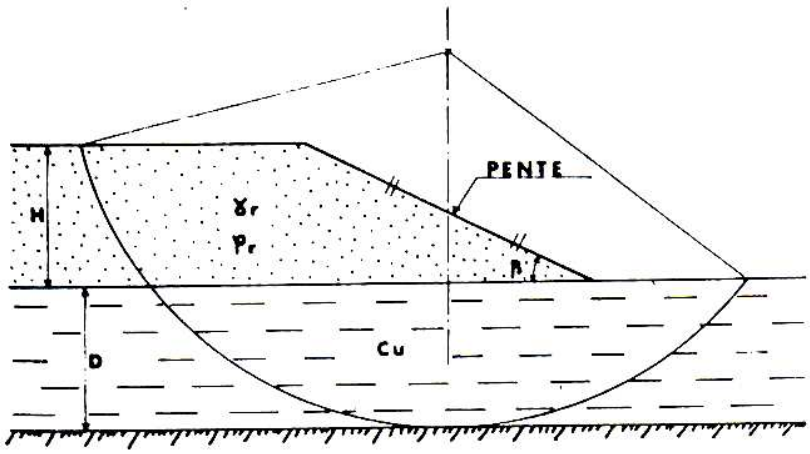
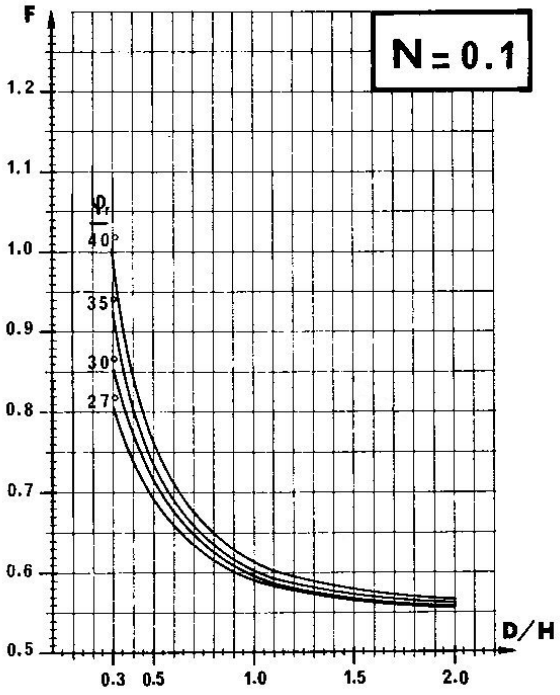
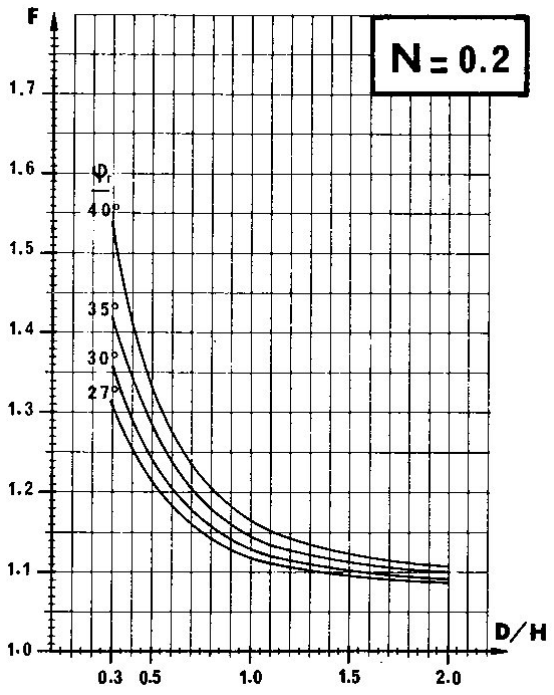


Figure 4. Coefficient correcteur $\mu(I_p)$ appliqué à la cohésion non drainée mesurée au scissomètre de chantier pour les calculs de stabilité des remblais sur sols mous.



$$N = \frac{C_u}{\gamma_r . H}$$

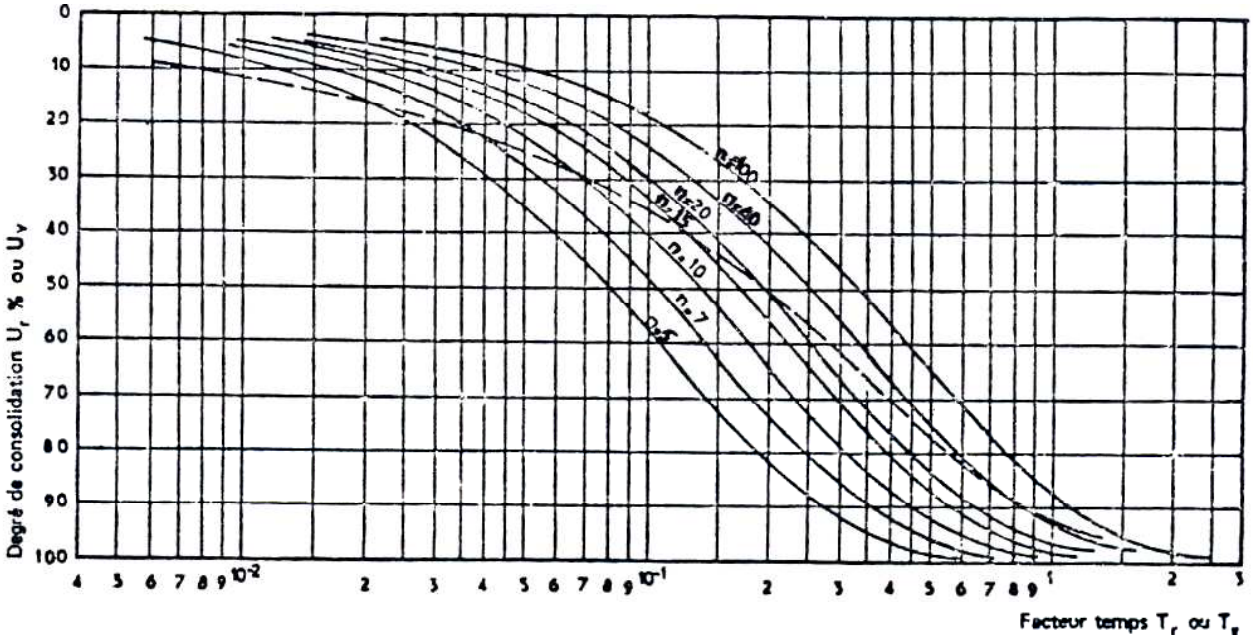




Mode d'emploi

1. Calculer la valeur de $N = c_u / (\gamma_r H)$ correspondant aux données du cas étudié. Soit N_1 cette valeur. Choisir les deux abaques dont les N encadrent la valeur de N_1.
2. Lire sur chaque abaque la valeur du coefficient de sécurité F qui correspond à la valeur du rapport géométrique D/H et à la valeur de l'angle de frottement interne du remblai φ_r.
3. Le coefficient de sécurité F associé à N_1 est interpolé entre les deux valeurs lues dans les deux abaques.

Figure 5. Extraits des abaques de Pilot et Moreau (1973) pour les calculs de stabilité de remblais sur sols mous (Remblai sans cohésion, pente du talus 1/2).



_____ Valeur du degré de consolidation U_r en fonction de n = D/d et $T_r = c_r t/D^2$, dans le cas de la déformation uniforme

– – – – – – – – Valeur du degré de consolidation U_v en fonction de $T_v = c_r t/H^2$

Figure 6. Abaque pour le calcul de la consolidation radiale.

C. Amélioration du sol de fondation

Des calculs de stabilité complémentaires ont montré que l'on pourrait construire le remblai par étapes jusqu'à l'épaisseur finale et dans le délai prévu à condition d'obtenir 80% de consolidation en 6 mois sous chaque charge.

La solution retenue consiste à mettre en place sous le remblai des drains verticaux préfabriqués de 5 cm de diamètre équivalent sur les dix-sept premiers mètres de la couche compressible (On ne peut descendre jusqu'au substratum perméable du fait de l'existence des surpressions artésiennes dans la couche de graves).

Pour déterminer l'espacement des drains, on utilise l'abaque de Barron de la figure 6. Cet abaque donne les variations du degré de consolidation radiale U_r en fonction du facteur temps $T_r = c_r t/D^2$ et du rapport n = D/d du diamètre D de la zone d'influence du drain au diamètre d du drain. Pour ce calcul, on a besoin du coefficient de consolidation radiale c_r du sol argileux, que l'on n'a pu mesurer. On sait toutefois que c_r est compris entre c_v et $5c_v$.

C1. Calculer l'espacement des drains (maille triangulaire) dans chacun de ces deux cas limites ($c_r = c_v$ et $c_r = 5c_v$).

C2. Quel sera au bout de six mois le degré de consolidation de la couche de 3 m d'épaisseur comprise entre la base des drains et la couche de graves? On admettra pour ce calcul que la consolidation de cette couche est unidimensionnelle. (Courbe en pointillé sur la figure 6).

D. Contrôle de l'efficacité des drains

Le maître d'œuvre a décidé de réaliser le réseau de drains correspondant à l'hypothèse la plus optimiste (c_r =5 c_v) et de mettre en place des appareils de mesure (piézomètres et tassomètres) pour contrôler le déroulement de la consolidation. Au bout de trois mois, il souhaite savoir si le réseau de drains est assez efficace ou s'il faut rajouter des drains pour accélérer la consolidation.

La vérification sera effectuée en utilisant la méthode d'Asaoka, qui est dérivée de l'expression analytique de la solution de la théorie de la consolidation radiale de Barron :

$$s(t) = s_\infty \left\{ 1 - exp\left[- \frac{8 c_r t}{D^2 F(n)} \right] \right\} \ ,$$

où s(t) est le tassement au temps t, s_∞ est la valeur finale du tassement, D est le diamètre de la zone d'action cylindrique du drain, n = D/d, d est le diamètre équivalent du drain et

$$F(n) = \frac{n^2}{n^2 - 1} ln(n) - \frac{3n^2 - 1}{4n^2} \ .$$

Les tassements correspondant à une série de temps t_i en progression arithmétique :

$$\{ s_i = s(t_o + i\Delta t) \}_{i=0,1,2,...}$$

vérifient l'équation de récurrence du premier ordre :

$$s_i = \beta_o + \beta_1 s_{i-1} \ ,$$

dont les coefficients dépendent de s_∞ et de $c_r/D^2F(n)$:

$$\beta_o = s_\infty (1 - \beta_1) \ ,$$

$$ln\, \beta_1 = - \frac{8 c_r \Delta t}{D^2 F(n)} \ .$$

On peut déterminer ces deux coefficients en représentant les tassements s_i sur un graphique (s_{i-1}, s_i) et en traçant une droite par ces points. En pratique, s_∞ est déterminé directement par l'intersection de la droite avec la bissectrice des axes et β_1 permet de calculer c_r.

D1. Appliquer cette méthode d'analyse aux résultats des mesures donnés dans le tableau 2. Calculer s_∞ et de c_r.

D2. Faut-il augmenter le nombre des drains ou bien obtiendra-t-on 80% de consolidation au bout de six mois avec le réseau existant ?

Tableau 2. Tassements au cours du temps de la couche d'argile molle (17 m)

Temps (j)	0	10	30	50	70	90
Tassement (m)	0	0,20	0,48	0,72	0,92	1,10
L'origine des temps correspond à l'exécution des drains. Les tassements sont mesurés à partir de l'exécution des drains. L'épaisseur du remblai est restée constante pendant toute la période de mesure.						